II. Méthodes et outils de conception

II.1. Outils de la CAO

Plusieurs outils de CAO ont été développés pour réaliser les deux étapes de la CAO (des machines électriques). On va décrire brièvement, le principe de base de ces outils et énumérer leurs différents types, que ce soit ceux concernant le choix de la structure à concevoir, ou ceux du dimensionnement de la structure choisie.

II.1.1. Outils d'aide au choix de la structure du dispositif à concevoir

Cette étape est difficile à programmer car, comme on déjà l'a mentionné, il s'agit de faire une collecte de connaissances et d'intégrer l'expérience, le savoir faire et la créativité.

On peut simplifier cette étape, en mettant en place une base de données qui regroupe l'ensemble des solutions qui existent pour des problèmes typiques et leurs caractéristiques respectives. Une comparaison des performances et des caractéristiques requises par le cahier des charges avec celles de la base de données permet de choisir systématiquement la structure la plus adaptée du dispositif à concevoir.

Des outils performants se basant sur l'intelligence artificielle, tels que les systèmes experts, sont naturellement les plus adaptés à ce type de tâches. En effet, ils servent à imiter le raisonnement d'un expert en la matière, lorsqu'il est confronté au choix d'une structure parmi plusieurs solutions. Ces outils sont généralement des programmes orientés objet qui permettent de prendre cette décision de choix en manipulant une certaine expertise acquise ou préprogrammée à l'avance.

On ne s'intéresse pas dans ce travail à cette étape de conception qui est très délicate et peu développée, car assez souvent, la structure du dispositif est généralement imposée dans le cahier des charges et le travail le plus important est le dimensionnement de la structure. Aussi, faut-il ajouter, que cette étape de conception ne permet pas de trancher définitivement entre plusieurs structures et seul le dimensionnement permet un choix objectif et final.

II.1.2. Outils de dimensionnement de la structure du dispositif à concevoir

Les outils mis en œuvre pour assister le concepteur à dimensionner la structure choisie d'un dispositif peuvent être regroupés en trois familles. Ils partent tous les trois d'un modèle mathématique d'une structure de base préalablement choisie dans la première étape de la CAO d'un dispositif, mais ils utilisent des approches différentes pour dimensionner la structure en "inversant" le modèle de base.

II.1.2.1. Outil de dimensionnement par une approche procédurale

Cette approche consiste à développer une procédure qui traite les équations dans un ordre logique et ramène ponctuellement le dimensionnement à une suite de problèmes mathématiques simples ne demandant pas d'algorithmes numériques lourds et compliqués. Elle part d'un modèle mathématique assez simplifié et, au fur et à mesure, on fait des tests et des boucles pour rectifier des choix non judicieux ou corriger des calculs afin d'améliorer le dimensionnement. Ces procédures, sont suffisamment décrites dans les ouvrages habituels de dimensionnement des machines électriques.

D'autre part, cette approche qui est basée sur une synthèse fine et une grande expérience dans le domaine, ne nécessite pas généralement de point initial, ce qui veut dire qu'elle permet le dimensionnement de la structure sans avoir une idée a priori de l'ordre de grandeur de ses paramètres descriptifs.

Néanmoins, la qualité de la solution trouvée reste loin d'être performante à cause des hypothèses simplificatrices avancées pour établir le modèle et des variables qui ont été fixées empiriquement au début. Autrement dit, même si la solution conçue satisfait le cahier des charges, elle est rarement optimale. En plus, si le temps mis pour trouver une solution, une fois la procédure programmée, est généralement court. Il reste à signaler que cette approche n'a rien de générique, car chaque dispositif à dimensionner possède sa propre procédure de dimensionnement. Par ailleurs, cette approche aboutit à des structures en se basant sur des modèles analytiques très simplifiés et sur des connaissances empiriques issues de l'expérience. C'est pourquoi une vérification des performances et des caractéristiques obtenues par cette approche, en utilisant des outils de modélisation numérique très puissants, est plus que nécessaire.

II.1.2.2. Outils de dimensionnement utilisant des systèmes experts

Une approche de dimensionnement basée sur des techniques de l'intelligence artificielle est un système expert qui peut reproduire le raisonnement d'un expert en prenant une décision vis à vis d'un problème de conception quelconque. Cette discipline, à part, d'aide au dimensionnement des dispositifs, englobe toutes les connaissances et les règles nécessaires à une procédure de conception d'une catégorie de dispositifs bien déterminée. En d'autres termes, cette approche projette une reproduction de la procédure de conception telle qu'elle est pratiquée par un expert en la matière. Cela exige une adaptation du raisonnement aux résultats déjà obtenus et aux situations imprécises ou incertaines. Ce raisonnement de haut niveau et cette prise de décision peuvent être pris en charge par la technique de la logique floue.

Bien que ces logiciels de CAO, basés sur des systèmes experts, soient évolutifs et puissent traiter les deux phases de la conception d'une structure, ils prennent un grand temps pour la mise en œuvre et ils sont en général longs, de par l'utilisation d'un langage symbolique de haut niveau.

II.1.2.3. Outils de dimensionnement à l'aide d'algorithmes d'optimisation

Une autre alternative très utilisée comme outil d'aide au dimensionnement des dispositifs électrotechniques est basée sur des algorithmes d'optimisation. En effet, dans le cas où le cahier des charges est réalisable, il existe en général une infinité de solutions à un problème de dimensionnement donné. N'est-il pas intéressant dans ces conditions de rechercher la meilleure conception en optimisant une performance ou une caractéristique du dispositif à dimensionner tels que le rendement, le coût, le facteur de puissance, d'un convertisseur électromécanique par exemple, …etc. ?.

On cherche alors à rendre extrémale, une performance ou une caractéristique du dispositif à dimensionner, appelée la fonction objectif, tout en respectant un ensemble de contraintes techniques et/ou économiques imposées à la structure finale du dispositif.

Le formalisme d'un problème d'optimisation en génie électrique, est composé de la fonction objectif à rendre extrémale (minimale s'il s'agit de pertes, de coût ou de masse,…etc.; maximale s'il s'agit de rendement, de facteur de puissance, de force ou de couple,…etc.) et d'un ensemble de contraintes (performances limites, contraintes physiques, limites géométriques de l'espace d'exploration, …etc.) sous forme d'égalités et/ou d'inégalités qui peuvent être linéaires ou non linéaires, implicites ou explicites, à respecter.

Un algorithme d'optimisation part d'une conception initiale (structurelle ou dimensionnée) puis ajuste un ensemble de paramètres, itération après itération, jusqu'à ce que la fonction objectif atteigne son optimum tout en respectant l'ensemble des contraintes imposées par le cahier des charges. Cette approche convient donc parfaitement au problème de l'amélioration d'une structure déjà existante.

Pour traiter un tel problème de dimensionnement optimisé, on a besoin de :

a. Un outil d'analyse du dispositif à optimiser : C'est un programme de calcul qui permet d'établir une relation quantitative entre les paramètres de construction et de fonctionnement d'un dispositif et permet ainsi de calculer les performances et les contraintes physiques mentionnés dans le cahier des charges, en fonction des paramètres descriptifs du système à optimiser. Dans le cas des convertisseurs électromécaniques, deux types d'outils d'analyse se présentent, basés respectivement sur des modèles analytiques spécifiques à chaque structure, ou des modèles numériques plus généraux permettant une analyse plus fine tels que ceux s'appuyant sur des équations de champs électromagnétiques traitées par la méthode des éléments finis par exemple.

b. Un algorithme d'optimisation : Plusieurs techniques ont été développées et peuvent être regroupées en deux grandes familles d'algorithmes, de deux manières différentes. On distingue d'une part les algorithmes d'optimisation déterministes ou stochastiques et d'autre part les algorithmes d'optimisation à recherche locale, ou à exploration globale.

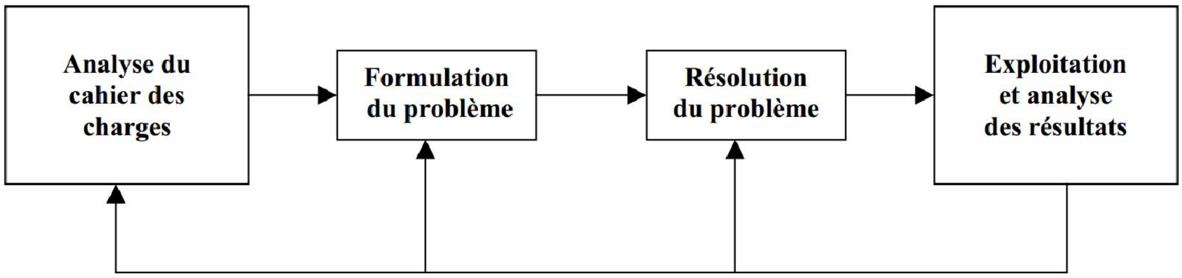
On s'intéresse dans ce travail aux outils de dimensionnement optimisé des dispositifs électrotechniques, qu'on appellera vaguement, outils d'aide à la CAO optimisée, ou bien CAO optimisée des dispositifs électrotechniques, tout court. De ce fait, quelques détails concernant les outils d'analyse et les algorithmes d'optimisation (les deux composantes constitutives d'un outil de CAO optimisée) seront donnés dans ce qui suit.

II.2. Méthodologie de conception

La méthodologie de conception doit faire l'objet d'une démarche systématique qui comporte quatre phases récapitulées dans la figure II.1. Les phases peuvent s'enchaîner séquentiellement mais les itérations et les retours sont bien souvent indispensables.

A partir d'un cahier des charges clairement exprimé, le concepteur a la tâche de le traduire dans l'un des formalismes mathématiques que nous verrons dans la suite. Ensuite vient sa résolution au moyen d'un algorithme ou méthode d'optimisation. Pour chaque formulation, il existe une multitude d'algorithmes adaptés. Enfin, l'exploitation et l'analyse des résultats par le concepteur expert permettent de valider la solution optimale obtenue.

En pratique, les choses ne sont pas aussi simples, lors de l'analyse des résultats, il apparaît bien souvent que la solution obtenue ne peut être retenue en raison de causes multiples.



• aucune solution faisable;
• objectif mal définis;
• contraintes manquantes.

• solution non réalisable;
• solution aberrante;
• erreur fatale;
• imprécision du modèle.

• problème de convergence;
• optimum local;
• mauvaises conditions initiales.

Figure II.1. Itérations possibles lors de la conception

La boucle la plus courte consiste en un retour sur la résolution du problème, elle peut être motivée par un problème de convergence de l'algorithme signalé par le fait que les conditions d'optimalités ne sont pas remplies pour la solution trouvée ou par un arrêt de la procédure suite à un temps de calcul excessif. Il est alors possible de modifier les paramètres de réglage de l'algorithme qui en font usage.

La boucle intermédiaire est un retour sur la formulation du problème d'optimisation, ce retour est nécessaire lorsque la résolution du problème conduit à une solution remplissant le critère mathématique d'optimalité. Dans ce cas, la démarche permet au concepteur d'affiner son expérience par une série d'essais/erreurs au cours de laquelle il en apprend davantage sur les limites des modèles utilisés et sur la façon de formuler le problème d'optimisation pour obtenir des solutions pertinentes.

La boucle la plus longue consiste à revenir sur l'analyse du cahier des charges ou sur le cahier des charges lui-même. Il peut se produire que la démarche de conception aboutisse à la conclusion qu'il n'existe pas de solution faisable au cahier des charges exprimé. Dans ce cas, la démarche proposée peut être utilisée de façon itérative: Le concepteur relaxe des contraintes pour aboutir à une solution faisable en dialoguant avec le client pour arbitrer parmi les choix possibles.

II.2.1. Analyse du cahier des charges

Le cahier de charge, définit en amont, exprime les besoins des utilisateurs en termes de fonctions de service et contraintes à satisfaire. Par exemple, il précise le rendement, l'encombrement, la maintenance et la robustesse de la chaîne de traction électrique d'un moteur synchrone à aimants permanents à commutations électroniques.

La phase de rédaction du cahier des charges impose une caractérisation rigoureuse du dispositif à concevoir et n'est pas traitée ici. Elle peut s'appuyer sur des méthodologies et techniques de management de projets.

II.2.2. Formulation du problème d'optimisation

Cette phase consiste à traduire le problème de conception, décrit par le cahier des charges, en un problème mathématique équivalent. C'est l'étape la plus délicate du processus de conception car, la formulation d'un problème n'est jamais unique.

Elle consiste à définir de façon précise :

1. La fonction objectif.
2. Les paramètres de conception.
3. Les éventuelles contraintes liées à la fabrication ou à l'utilisation du dispositif et donc exprimées dans le cahier des charges.
4. Les contraintes ajoutées par le concepteur.

La fonction objectif définit l'objectif à atteindre et peut être de deux natures : un coût à minimiser (coût de fabrication, consommation, coût d'exploitation, durée de développement) ou une performance à maximiser (profit, rendement, facteur de transmission).

Dans le cas d'un objectif unique, le choix de cette fonction est évident. Par exemple, dans le cas où le but est de trouver les caractéristiques d'un dispositif produisant des performances dont les valeurs sont spécifiées, la fonction objectif peut prendre comme expression l'écart entre les performances et les spécifications. Cependant, les problèmes d'optimisation doivent souvent satisfaire des objectifs multiples dont certains sont concurrents.

Les paramètres ou variables de conception sont des facteurs contrôlés qui permettent d'influencer les performances. Ils peuvent être de natures diverses : dimensions géométriques, propriétés des matériaux, choix structurels, etc. Ils peuvent être quantitatifs ou qualitatifs, continus ou discrets. Le choix et le nombre des paramètres conditionnent aussi la définition du problème d'optimisation. Il peut être intéressant de faire varier un grand nombre de facteurs afin d'augmenter l'espace de recherche mais le processus d'optimisation sera alors plus long.

Des contraintes peuvent être ajoutées par le concepteur pour avoir, par exemple, une forme géométriques convenable.

La formulation du problème d'optimisation est fondamentale dans le processus de conception parce qu'elle conditionne le succès des étapes suivantes. Elle n'est pas facile à aborder car le choix des variables de conception n'est jamais unique et les moyens de calcul actuels ne peuvent en gérer qu'un nombre limité.

II.2.3. Résolution du problème d'optimisation

La recherche de l'optimum d'un problème est réalisée à l'aide de méthodes d'optimisation qui seront présentées dans la deuxième partie.

Certaines de ces méthodes sont dites déterministes car elles conduisent, pour une solution initiale donnée, toujours au même résultat final. Pour trouver l'optimum, elles s'appuient sur une direction de recherche qui peut être fournie par les dérivées de la fonction objectif. Ces méthodes ont la réputation d'être efficaces lorsque la solution initiale est proche de l'optimum recherché. Cette particularité constitue un inconvénient majeur dans le cas d'une fonction objectif possédant plusieurs optimums. Elles peuvent, en effet, converger vers un optimum local.

Les méthodes stochastiques, contrairement à la plupart des méthodes déterministes, ne nécessitent ni point de départ, ni à la connaissance du gradient de la fonction objectif pour atteindre la solution optimale. Elles s'appuient sur des mécanismes de transition probabilistes et aléatoires qui explorent efficacement l'espace de recherche et convergent vers l'optimum global. Leur nature aléatoire implique que plusieurs exécutions successives de ces méthodes conduisent à des résultats différents pour une même initialisation du problème d'optimisation. Cependant, elles demandent un nombre important d'évaluations de la fonction objectif en comparaison avec les méthodes déterministes exploitant la dérivée de la fonction objectif.

II.2.4. Analyse et exploitation des résultats

Une fois le problème résolu, il est impératif d'évaluer la qualité de la solution et en cas d'échec de s'interroger sur les choix adoptés lors des phases précédentes. On attribue souvent l'échec de l'optimisation à la méthode de recherche employée pour la localisation de l'optimum ou à la sensibilité des paramètres de cette méthode alors que le problème est peut être mal formulé.

Un cahier des charges peut être non faisable à cause de contraintes trop sévères ou parce que la fonction objectif n'est pas pertinente. Par exemple, la réduction des oscillations de couple doit être faite en ajoutant une contrainte pour maintenir le couple moyen. Il se peut que le problème soit mal formulé par manque de contraintes qui n'apparaissent pas explicitement dans le cahier des charges. Il est alors nécessaire de les ajouter.

Le choix de la méthode de résolution peut être effectivement erroné et il est nécessaire de s'assurer de l'adéquation entre la méthode de résolution et le modèle retenu. En effet, si le modèle n'est pas continu et différentiable ou si l'expression de la fonction objectif n'est pas explicite, il est imprudent d'utiliser les méthodes déterministes du premier ordre, c'est-à-dire qui utilisent les dérivées premières de la fonction objectif.

II.3. Formulation d'un problème d'optimisation

Un problème d'optimisation se présente schématiquement comme suit : une variable physique ou une variable de décision ou de commande doit être choisie de façon optimale, c'est-à-dire de façon à optimiser (minimiser ou maximiser selon le cas) un critère physique (énergie, pertes, couple,…), un critère technique (précision, stabilité,...) ou économique (coût, rentabilité, productivité,…), tout en respectant certaines contraintes intrinsèques à la situation considérée.

La mesure du critère d'optimisation est obtenue à partir de son expression mathématique f, appelée fonction objectif ou fonction coût. Elle est généralement calculée à partir des paramètres d'optimisation X et des variables d'état issues de la simulation numérique, dépendant elles mêmes, au moins implicitement, des paramètres X**.**

Si nous considérons le vecteur X de dimension n, dont les n éléments représentent les variables ou paramètres d'optimisation :

$X = [x_1, x_2, ... x_n]$

$f(x)$ la fonction objectif

R^n l'espace de recherche réalisable

Alors, de manière générale un problème d'optimisation peut être écrit sous la forme suivante:

$$\begin{cases} \text{Min } f(x) \in R^n \\ g_i(x) \le 0 \qquad i = 1,...,m \\ h_j(x) = 0 \qquad j = 1,...,p \\ x_{k\,min} \le x_k \le x_{k\,max} \quad k = 1,...,n \end{cases} \qquad (1)$$

où :

$g_i(x)$ et $h_j(x)$ représentent respectivement les contraintes d'inégalité et d'égalité

x_{kmin} et x_{kmax} désignent les contraintes de domaine.

Nous donnons ci-dessous quelques définitions concernant le problème (1).

II.3.1. Minimum local

Un point x^* appartenant à l'espace de recherche réalisable R^n est un minimum local de la fonction objectif f dans R^n s'il existe un voisinage Δ :

$$\Delta \equiv \left\{ x \in R^n / \left\| x - x^* \right\| \le \delta \right\} \qquad (2)$$

tel que :

$$\forall x \in \Delta \quad f(x) \ge f(x^*) \qquad (3)$$

II.3.2. Minimum global

Un point x^* appartenant à l'espace de recherche réalisable R^n est un minimum global de f si :

$$\forall x \in R^n \quad f(x) \ge f(x^*) \qquad (4)$$

Le minimum global est le petit minimum local. La figure II.1 illustre la notion du minimum local et minimum global. La nature de l'optimisation est de déterminer un optimum global, malheureusement cela n'est pas possible que dans certains cas particuliers.

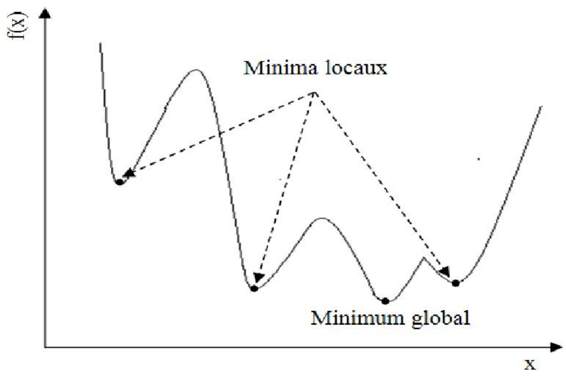


Figure II.1. Minima locaux et minimum global d'une fonction f

II.3.3. Formulation des fonctions objectifs

L'étape clé dans la résolution d'un problème d'optimisation (1) est la définition de la fonction objectif f. Elle prend différentes formes relatives au problème traité.

En électrotechnique généralement deux cas de problèmes sont distingués : problème de performance à maximiser et celui de coût à minimiser.

Dans la première catégorie, l'objectif est de déterminer les valeurs des paramètres de conception X capables de maximiser les grandeurs G^c issues du calcul numérique direct. Le problème peut être formulé comme suit:

$$f(x)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} G_i^c(x) \tag{5}$$

où

N représente le nombre de points de calcul.

Dans la deuxième catégorie, on cherche à déterminer les valeurs des paramètres de conception X capables d'approcher le plus possible les grandeurs G^c issues du calcul numérique direct aux valeurs des grandeurs désirées G^d.

L'objectif est de minimiser les erreurs ε_i, entre ce qui est calculé et ce qui est désiré, en utilisant le plus souvent une expression de type moindres carrées qui conduit à la formulation suivante :

$$f(x)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} \varepsilon_i^2(x) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(G_i^c(x) - G_i^d\right)^2 \tag{6}$$

De façon générale, les deux cas de problèmes présentent souvent la recherche de la minimisation d'une fonctionnelle. Donc, les méthodes d'optimisation applicables pour l'un sont aussi applicable pour l'autre.

II.4. Problème d'optimisation non contraint

Un problème d'optimisation sans contraintes est défini sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \text{Min } f(x) \in R^n \\ x_{k\,min} \le x_k \le x_{k\,max} \quad k = 1,\dots,n \end{cases} \tag{8}$$

Il est similaire au problème (1) sauf que les fonctions contraintes $g_i(x)$ et $h_j(x)$ ne sont pas définies.

II.4.1. Condition d'optimalité

Pour résoudre un problème d'optimisation non contraint, il est nécessaire de caractériser la solution par des conditions. Ces conditions sont utilisées pour identifier le minimum et constituent la base des techniques numériques utilisées pour la résolution de problème (8).
Les conditions de premier et second ordre nécessaires pour que x^* soit un minimum local d'un problème non contraint sont données par :

$$\begin{cases} \nabla f(x^*) = 0 \\ H(x^*) \geq 0 \end{cases} \tag{9}$$

avec :
∇f est le gradient de la fonction objectif
$H = \nabla^2 f$ est la matrice de dérivées secondes partielles de f, dite la matrice Hessienne ou le Hessien.
Les conditions d'optimalité suffisantes pour que x^* soit un minimum local de f sont données par :

$$\begin{cases} \nabla f(x^*) = 0 \\ H(x^*) \quad \text{positive} \end{cases} \tag{10}$$

Les conditions données par (9) et (10) sont uniquement valables pour les fonctions continûment différentiables.

II.4.2. Méthodes d'optimisation déterministes

Cette classe de méthodes est caractérisée par une évolution prévisible vers la solution, ne laissant aucune place au hasard. En partant de la même configuration initiale, une méthode d'optimisation déterministe fournit le même résultat. Ce sont des méthodes locales, c'est-à-dire qu'elles convergent vers un optimum dépendant uniquement de la configuration initiale, qu'il soit local ou global.

Elles sont classées en trois groupes suivant l'ordre de dérivabilité de la fonction objectif nécessaire pour résoudre le problème d'optimisation.

- ***Méthodes déterministes d'ordre zéro***

Elles sont dites aussi méthodes heuristiques ou géométriques. Leur principe est basé sur l'exploration de l'espace de recherche par des essais successifs en recherchant les directions les plus favorables et nécessitent uniquement la connaissance de la fonction objectif. L'intérêt principal de telles méthodes réside dans le fait qu'elles ne nécessitent pas la connaissance des dérivées de la fonction objectif. Pour cela, elles sont souvent utilisées pour la résolution des problèmes discontinus. Dans cette catégorie des méthodes déterministes on trouve principalement : la stratégie de Hooke et Jeeves, la méthode de Rosembrok et la méthode du Simplex.

- ***Méthodes déterministes d'ordre un***

Ces méthodes nécessitent en plus de l'évaluation de la fonction objectif l'évaluation de son gradient à chaque itération. La connaissance de gradient donne des informations sur la direction de recherche et donc la localisation rapide de l'optimum. Par contre, elles sont applicables uniquement aux problèmes où la fonction objectif est continûment différentiable. Parmi les méthodes déterministes d'ordre un les plus utilisées on trouve : la méthode de la plus grande pente et la méthode du gradient conjugué.

- ***Méthodes déterministes d'ordre deux***

Ces méthodes approfondissent, par rapport aux méthodes d'ordre un, l'étude locale de la fonction objectif en utilisant les dérivées secondes pour déterminer la direction de recherche. Les principales méthodes utilisées sont les méthodes de Newton et leurs dérivées, communément appelées méthodes de quasi-Newton.

II.4.3. Méthodes d'optimisation stochastiques

Les méthodes stochastiques s'appuient sur des mécanismes de transition probabilistes et aléatoires. Cette caractéristique indique que plusieurs exécutions successives de ces méthodes peuvent conduire à des résultats différents pour une même configuration initiale.

L'avantage principale des méthodes stochastiques réside dans leur capacité à trouver l'optimum global. Contrairement aux méthodes déterministes d'ordre supérieur ou égal à un, elles ne nécessitent ni point de départ, ni connaissance du gradient de la fonction objectif pour atteindre la solution optimale. Cependant, elles demandent un nombre important d'évaluations de la fonction objectif. Parmi les méthodes stochastiques les plus utilisées on trouve : Monte-Carlo, le Recuit Simulé, la Recherche Taboue et les méthodes évolutionnistes. Cette dernière inclue les algorithmes génétiques, stratégies évolutionnistes et programmation évolutionnistes.

II.5. Problème d'optimisation contraint

Un problème mathématique d'optimisation continue sous contraintes est donné par l'équation (11) qui est aussi équivalent à l'équation (1) :

$$\begin{cases} \mathrm{Min}\ f(x) \in R^n \\ g_i(x) \le 0 \qquad i = 1,\dots,m \\ g_i(x) = 0 \qquad i = m+1,\dots,p \\ x_{k\,min} \le x_k \le x_{k\,max} \quad k = 1,\dots,n \end{cases} \tag{11}$$

où la fonction g_i représente les contraintes d'inégalité et d'égalité.

L'espace de recherche de la solution est dit réalisable ou admissible lorsque toutes les contraintes associées au problème d'optimisation sont respectées ou vérifiées. Les régions dans lesquelles ces contraintes sont violées sont désignées d'interdites ou d'irréalisables.